• feature 集点面アレイ

SWIR 3Dイメージングを可能にする ガイガーモード焦点面アレイ

マーク・イツラー、マーク・エントウィッスル

ガイガーモードアバランシェフォトダイオード(APD)アレイとCMOS 読取り集積回路(ROIC)を適切に組合せて、3D撮像ライダシステム用の理想的なセンサ部品としての焦点面アレイ(FPA)が開発された。このFPAは短波長赤外(SWIR)波長において単一光子感度が得られる。

イメージングの分野で起きた最近の 最も劇的な変化の一つは3次元(3D)画 像の利用が増大したことであろう。3D 画像ディスプレイは医療装置や産業用 途にとって必須の手段になっている が、映画産業においても当たり前のも のになり、家庭用ゲーム機では爆発的 な成長を記録している。このような3D 画像ディスプレイの急増は3D画像の取 得法が著しく進歩して実現された。今 までの3D画像の記録はさまざまな方法 (異なる角度から取得したシーンの2D画 像を用いる立体写真など)を用いて行わ れてきたが、最も効果的な3D画像の取 得法は光検出と測距(ライダ)による方 法であろう。ライダ技術は、まず、短 い光パルスをシーンに照射し、シーン中 の物体から反射するパルスの飛行時間 を精密に測定して、距離の正確な情報 を取得する。この情報には自然の反射 光を用いて記録する通常の画像では得 られない第3空間次元のデータが含ま れる。次に、3Dカメラを構成し、撮像 焦点面アレイの全画素のそれぞれにラ イダ技術を適用する(図1)。

多数の撮像用途(とくに防衛に関係する応用)に対して、光スペクトルのSWIR領域でのライダ撮像は非常に適した手法になる。つまり、この波長は高性能の短パルスレーザ光源 $(1.06\,\mu\mathrm{m}$ のNd: YAGレーザと $1.55\,\mu\mathrm{m}$ のエルビ

ウムドープファイバレーザ)が利用できる、これらの光源は広く使われている暗視ゴーグルでは見えないため秘匿性を確保できる、これらの波長は大気を低損失で伝搬する、1.4 μ m以上の波長は短い波長よりも相対的にアイセーフになる、などの特徴が得られる。

単一光子ライダ

光学イメージャの究極の感度はそれぞれの撮像画素が単一光子だけを効率よく取得するときに得られる。3Dライダ撮像の距離精度は飛行時間の測定精度から決まるため、その単一光子検出は高速かつ時間的に正確なことが必須になる。

SWIR 波長での単一光子検出を優れた時間精度で可能にする検出器技術の一つは、ヒ化リン化インジウムガリウム (InGaAsP)材料系に基づくAPDだ。このデバイスをアバランシェ破壊電圧以

上でバイアスすると、単一光子だけの 吸収が巨視的アバランシェ電流パルス を生成し、後段の電子回路によるパル ス検出が容易になる。APDを適切に設 計すると、このモードはガイガーモード と呼ばれる動作を示し、高効率で正確 な単一光子検出が可能になる。また、 これらの検出器は高い画素密度をもつ 大型フォーマットアレイへ容易に集積 できる。われわれはガイガーモード APD (GmAPD)検出器アレイとCMOS ROIC を適切に組合せて、SWIR波長におい て単一光子感度が得られる3D撮像ラ イダシステム用の理想的なセンサ部品 である GmAPD 焦点アレイ (GmAPD FPA)を開発した。

これらのGmAPD FPAは、従来のシステム、つまり信頼性のある検出には画素当たり少なくとも数十光子、場合によっては数百光子の戻りパルスが必要になる検出器を用いるシステムに比べると、はるかに低いパルスエネルギーを検出できる。このようなGmAPDの性能からはシステムの寸法、重量および電力消費を大幅に低減する利点が生まれる。また、米MITリンカーン研究

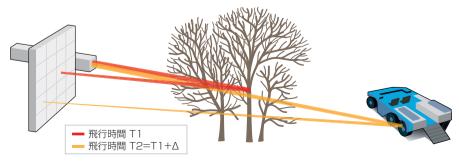


図1 3Dライダセンサは各画素の独立した飛行時間測定に基づいて、シーン中の物体の距離情報を取得する。前方にある不明瞭な物体(木の葉など)は距離データを補正して除去される。

所(MIT Lincoln Laboratory)の先駆的研究のような新しい機会も生まれる。

これらのGmAPD FPAを用いるカメラには、単一検出器を機械的に走査して3D画像のデータ群を取得する空中マッピングなどの既存の高性能3D撮像の応用を不要にする可能性がある。現在の単一検出器走査はデータの取得速度や地上の点密度などの重要な計量尺度に制約がある。単一走査検出器からイメージャ当たり数百万の画素をもつ大面積(2D)フォーマットへ移行したIRイメージング技術と同様に、3Dイメージング技術は間違いなく発展していくであろう。

GmAPD FPAの設計と性能

われわれのFPAの心臓部は、CMOS ROICに接合したGmAPD検出器アレイ フリップチップと、検出器アレイの背面 に取付けて高い光学充填率を確保した リン化ガリウム(GaP)マイクロレンズア レイからなる(図2)。ROICのすべての 画素に埋め込まれた擬似ランダム計数 器からは、反射したライダパルスを検 出したときの飛行時間の痕跡データが 画素レベルで得られる。単一光子パル スの弱い戻りは各画素の能動素子を GmAPDにすることで効率よく検出さ れる。約3usの非常に速い読取り時間 をもつROICは、大量の画像フレームの 高速取得を可能にする。FPAを装備し てライダパルスの戻りを検出する2μs オーダの標準的な「測距ゲート」を使 うと、これらのセンサは200kHzに近 いフレーム速度を達成できる。集積さ れた熱電冷却器(TEC)はチップの動 作温度を周囲よりも低い約50℃に維持 し、ハーメチック封止の実装が過酷環 境における安定な動作を可能にする。

1990年代後半のテレコムブームのときに成熟した光電子デバイスの設計技

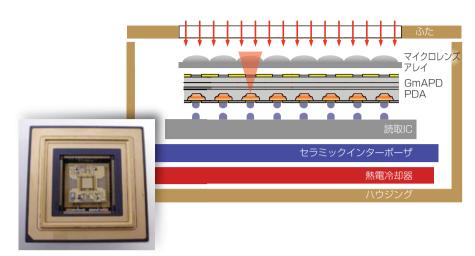


図2 GmAPD FPA は、ROIC、GmAPDアレイおよびマイクロレンズアレイと積層チップとの組合せで構成されている。マイクロレンズアレイは電気信号転送用のセラミックインターポーザに取付けられ、熱電冷却器を用いて冷却される。FPA部品はハーメチック封止の可能なセラミックパッケージ(蓋なしで示す)内に実装される(挿入図)。

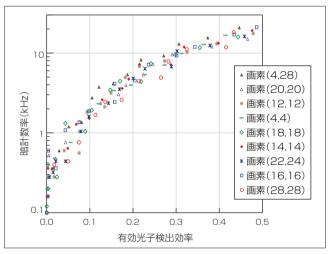


図3 有効光子検出効率 (PDE)に対する暗計数率 (DCR)の依存性はGm APD画素に対して最も基本的な性能トレードオフを示す。この性能マップデータはランダムサンプリングした画素の挙動と非常によく一致する。

術と作製技術を使用して、われわれは 単一光子検出用の平面配置 InGaAsP/InP APDの性能を再び最適化し、2DGmAPD FPAとの集積化を行った^{(2)、(3)}。入射光子の検出確率(光子検出効率またはPDEで定義される)は動作時のバイアス電圧を高めることで増加するが、入射光子のないときの誤り計数の確率(暗計数率またはDCRと呼ばれる)も増加する。このDCRとPDEとのトレードオフはGmAPDの動作時の最も基本的なパラメータのトレードオフになる(図3)。

1.06μm光子の検出用に最適化した

アレイを100%のオペラビリティで作製した。1024のすべての画素は40%に近い平均PDEを確保できる動作条件に対して20kHz以下のDCRを示した(図4)。より低いPDE動作を許容する場合はより低いPDE動作が可能である。動作温度の低下もDCRの低減には有効に作用し、温度が10%低下するとDCRは2%の1になる。

1.55μmの撮像のために、われわれは100%の画素オペラビリティを確保できる高収率のFPAを作製した。このような長波長の光子の検出は、より狭いバンドギャップの半導体を用いてエ

• feature 焦点面アレイ

ネルギーの弱い光子を効率よく吸収することが必要になるため、DCRを高くしたときの性能はかなり悪くなる。

タイミングジッタと呼ばれる光子の 到着の時間精度は、距離測定の精度の 制約する重要なパラメータになる。わ れわれは32×32 FPAの場合に、100ps の低い二乗平均平方根タイミングジッ タが得られることを実証した。

各画素の計数器を13ビットにしたときに、最大のフレーム速度で動作する全FPAからのタイムスタンプデータ出力は、非常に高速の4Gbpsのデータストリームであった。このデータは32チャネルデータバスを使用して、ROICからFPGA駆動基板電子回路へ転送する。次に、二重コネクタカメラリンク配置を使用して、計算機またはその他のストレージ媒質へのデータ伝送を行う。現在のターンキーカメラモジュールは、FPA制御、FPGA電子回路および支援電子回路用の2枚の基板を3.75インチの間隔で内蔵している。

その他の動作モードと将来の開発

GmAPDのアバランシェ応答のデジタル特性は検出器に到着する多数の光子に対して感度があるとは言えない。しかしながら、検出の確率は戻りパルスの数が増加すると劇的に向上する。例えば、単一光子の入力を検出する確率が約25%の動作条件において、10光子からなる入力パルスを検出する確率は>95%になる(4)。これは照射量(約10光子)に対して非常に高い検出確率であり、既存の撮像技術の多くはそれよりも低い感度閾値しか得られない。

われわれの既存カメラの電子回路動作は3D画像データの生成を目的にしているが、このセンサを受動方式にして周囲の放射を捕集すると、2D受動画像を単一光子感度で取得することもできる。

 図4 3.5Vの超過バイアスと 235Kの温度で動作する 32×32 InGaAsP/InP(1.06μ m) GMAPD FPAの全 1024 画素の DCR性能マップ (単位:kHz) を示している。すべての画素に対して 100%の画素オペラビリティが < 20 kHzの DCRで得られている。これらの動作条件下の PDE は $39\% \pm 5\%$ であった。

表1 1.06 µm GmAPD FPAの特性一覧

GmAPD FPAの特性	32×32	32×128
画素ピッチ(μm)	100	50
暗計数率(kHz)	15	15
光子検出効率(%)	4000%	3500%
タイミングジッタ(rms)(ps)	100	200
隣接画素間クロストーク(%)	<1	~1
最大フレーム速度(2μs ゲート)(kHz)	186	~115

さらに複雑な能動/受動撮像技術を用いると、2D画像と3D画像の二つの撮像モダリティを組合せることができる。

現在の 32×32 FPA 製品(http://bit.ly/eks7U6)の先にある将来の開発では、画素数の増加と画素ピッチの縮小に重点が置かれている。われわれは、すでに4倍の画素数と 50μ mの半ピッチをもつ 32×128 フォーマットのFPAの試作を実証した(**表1**)。このGmAPDの

設計と作製の実証によって、50μm以下の画素ピッチへの移行ばかりでなく、より大型のフォーマットを実現するための優れた基礎が得られたことが示された(MITリンカーン研究所は64×256の大きなアレイを50μmのピッチで実証している)。当面は32×32 GmAPD FPAセンサがライダ技術に基づく新世代3D撮像システムの開発を支援することになる。

参考文献

- (1) B.F. Aull et al., "Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiode," Proc. SPIE, 5353, 105-116 (2004).
- (2) M.A. Itzler et al., J. Mod. Opt., 54, 2-3,283-304(2007).
- (3) M.A. Itzler et al., "Design and performance of single photon APD focal plane arrays for 3D LADAR imaging," Proc. SPIE, 7780, 77801M(2010).
- (4) M. A. Itzler et al., "Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays for three-dimensional imaging LADAR," Proc. SPIE, 7808, 78080C(2010).

著者紹介

マーク・イツラー (Mark Itzler)は米プリンストン・ライトウエーブ社 (Princeton Lightwave)のCTO、マーク・エントウィッスル (Mark Entwistle)は同社のハードウエア設計マネージャ。e-mail: mitzler@princetonlightwave.com